

اثر دست خوردگی در رفتار دینامیکی نمونه‌های ماسه‌یی در آزمایش‌های ستون تشدید

سمیه احمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد

عطا آقایی آرای* (دانشیار)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش ژئوتکنیک و زیرساخت

حمید مهرنهاد (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد

ناهید عطاریان (استادیار)

ایرج رحمانی (استادیار)

امیر سعید سلامت (کارشناس)

حسین حسنی (کاردان)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش ژئوتکنیک و زیرساخت

مهندسی عمران شریف، پاییز (۱۳۹۹)
دربی ۲ - ۳۶، شماره ۲/۳، ص. ۱۵۹-۱۶۹، (پادداشت‌نوی)

سختی و میرایی از مهم‌ترین پارامترهای دینامیکی هستند. یکی از دلایل تفاوت بین مقادیر پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی با مقادیر صحرایی، دست - خوردگی نمونه‌هاست. در پژوهش حاضر، با انجام آزمایش ستون تشدید روی مصالح خاکی دست‌نخورده و دست‌خورده، رفتار دینامیکی خاک بررسی شده است. اثر تنش محدودکننده، رطوبت و ناهمسانی تنش در روند تغییرات پارامترهای دینامیکی بررسی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان دادند که دست‌خوردگی سبب کاهش سختی خواهد شد، اما تأثیری در میرایی نخواهد داشت. با افزایش تنش محدودکننده، مقادیر سختی و میرایی به ترتیب افزایش و کاهش خواهد یافت. رطوبت، کاهش سختی را به دنبال خواهد داشت، در حالی که در مقدار میرایی تأثیری نمی‌گذارد. ناهمسانی تنش نیز افزایش سختی را به دنبال خواهد داشت. روش نصف عرض توان نسبت به روش زوال دامنه‌ی ارتعاش، مقادیر نسبت میرایی بیشتری را ارائه می‌کند. نتایج پژوهش حاضر با مدل‌های پیشنهادی دیگر پژوهش‌گران نیز مقایسه شده است.

somayehmha@gmail.com
aghaeiaraei@bhrc.ac.ir
hmehrnahad@yazd.ac.ir
n.attarchian@bhrc.ac.ir
i.rahmani@bhrc.ac.ir
salamat@bhrc.ac.ir
hosseinhassani78@bhrc.ac.ir

واژگان کلیدی: مدول برشی، نسبت میرایی، ستون تشدید، نمونه‌ی دست‌نخورده،

نمونه‌ی دست‌خورده.

۱. مقدمه

پژوهش‌گران متعددی، اثر عواملی چون تنش محدودکننده، چگالی نسبی، ریزدانه‌ی غیرخمیری، درجه‌ی اشباع‌شدگی، نوع کانی، ناهمسانی تنش و روش اندازه‌گیری بر مدول برشی و نسبت میرایی را در سطوح کرنش متفاوت بررسی کرده‌اند.^[۱-۱۱] یکی از دلایل تفاوت بین مقادیر پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی با مقادیر صحرایی، دست‌خوردگی نمونه‌هاست. در حقیقت هیچ نمونه‌ی دست‌نخورده‌ی وجود ندارد؛ زیرا نفوذ جداره‌ی نمونه‌گیر، فارغ از این‌که تا چه حد نازک و با روش نمونه‌گیری تا چه حد دقیق باشد، منجر به دست‌خوردگی در مصالح درجا می‌شود. با وجود این، نمونه‌ی دست‌نخورده به نمونه‌ی گفته می‌شود که از نمونه‌گیر و روش نمونه‌گیری حاصل شود، که تا حد امکان ساختار طبیعی مصالح را حفظ کند.^[۱۲] عدم توجه به آثار دست‌خوردگی در خواص دینامیکی خاک‌ها در آزمایش‌ها و تحلیل‌های لرزه‌یی جنبش زمین می‌تواند موجب وقوع صدمات جدی در اثر تحلیل‌های غیرواقعی

خواصی از خاک که در پدیده‌ی انتشار امواج و سایر پدیده‌های کرنش کوچک تأثیرگذار است، خواص دینامیکی خاک گفته می‌شود، که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سختی و میرایی اشاره کرد.^[۱] مدول برشی در تراز کرنش‌های کوچک، که مدول برشی پیشینه نامیده می‌شود، به صورت G_{max} یا G_0 نشان داده می‌شود و یکی از کمیت‌های اساسی در تحلیل‌های ژئوتکنیک لرزه‌یی از جمله بررسی آثار ساخت‌گاهی به شمار می‌رود، که بخش زیادی از کارهای آزمایشگاهی بر تعیین آن متمرکز شده است.^[۲] از میان آزمایش‌های آزمایشگاهی، سادگی آزمایش ستون تشدید، آن را به کاربردی‌ترین وسایل اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی خاک‌ها در کرنش کوچک تبدیل کرده است.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۳/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۸/۶/۱۶، پذیرش ۱۳۹۸/۶/۲۶.

DOI:10.24200/J30.2019.53676.2571

زمین‌لرزه‌ها شود؛ به همین سبب شناخت رفتار دینامیکی مصالح از طریق انجام آزمایش‌های دینامیکی روی مصالح دست‌خورده و مقایسه‌ی آن با رفتار نمونه‌ی دست‌خورده، امری ضروری است. نتایج آزمایش‌های ستون تشدید بر روی نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده‌ی اخذ شده از هسته‌ی سدهای خاکی با مصالح ریزدانه، مقادیر کمتری برای نسبت میرایی و مقادیر بیشتری برای مدول برشی بی‌بُعد شده را در نمونه‌های دست‌خورده ارائه می‌دهد.^[۱۳] نتایج آزمایش ستون تشدید بر روی نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده‌ی لس لنز هو^۱ نشان می‌دهد که مدول برشی بیشینه‌ی نمونه‌های دست‌خورده از نمونه‌های دست‌خورده بیشتر است. همچنین مقدار نسبت میرایی نمونه‌ی دست‌خورده از نمونه‌ی دست‌خورده بیشتر بوده است.^[۱۴] نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دست‌خورده و دست‌خورده‌ی شنی نیز نشان می‌دهد که مقدار مدول برشی نمونه‌های دست‌خورده از نمونه‌های دست‌خورده بیشتر است، اما در مقدار نسبت میرایی برای هر دو نوع نمونه، تفاوت زیادی وجود ندارد. همچنین منحنی‌های مدول برشی بی‌بُعد شده‌ی نمونه‌های دست‌خورده و دست‌خورده، تقریباً بر هم منطبق است.^[۱۵، ۱۶]

رطوبت نیز به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در پارامترهای دینامیکی خاک‌ها، موضوع آزمایش‌های تعداد زیادی از پژوهش‌گران قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌های انجام شده بیان‌گر آن است که رطوبت سبب کاهش مدول برشی می‌شود، اما اثر آن در نسبت میرایی، تغییرات جزئی افزایشی یا کاهش می‌دهد.^[۱۷، ۱۸] یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در پارامترهای دینامیکی خاک، ناهمسانی تنش است. اعمال شرایط ناهمسانی تنش روی نمونه می‌تواند شرایط تنش درجای توده‌ی خاک را بهتر مدل و ارائه کند. نتایج آزمایش‌های المان خمشی پیزوالکتریک بر روی رس دریایی ماکائو^۲ نشان می‌دهد که در تنش مؤثر میانگین یکسان با افزایش نسبت تنش (σ_1/σ_2) ، مقدار سرعت موج برشی افزایش می‌یابد.^[۱۹] نتایج آزمایش‌های ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی بر روی نمونه‌های بازسازی شده‌ی ماسه‌ی نشان می‌دهد که ناهمسانی تنش، باعث افزایش مدول برشی می‌شود، ولی اثر آن در منحنی‌های مدول برشی بی‌بُعد شده ناچیز است. علاوه بر این، در تنش مؤثر میانگین یکسان با افزایش مقدار ناهمسانی، مدول برشی افزایش پیدا کرده است. همچنین منحنی‌های نسبت میرایی به سختی توسط ناهمسانی تنش تأثیر پذیرند.^[۲۰، ۲۱] پژوهش‌گران متعدد دیگر نیز اثر ناهمسانی تنش را در پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌یی توسط روش‌های مختلف آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند که ناهمسانی تنش افزایش مدول برشی را به دنبال خواهد داشت.^[۲۲، ۲۳]

نسبت میرایی به صورت جاذب انرژی در محیط خاک در طول انتشار موج یا بارگذاری سیکلیک تعریف می‌شود، که به شدت از سطح کرنش اعمالی تأثیر می‌پذیرد. امروزه با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی فناوری آزمایش‌های خاک، امکان اندازه‌گیری دقیق و قابل قبولی از نسبت میرایی در کرنش‌های کوچک برای مصالح خاکی فراهم شده است.^[۲۴] نتایج رفتار میرایی در برابر کرنش برشی ماسه با استفاده از آزمایش ستون تشدید با هر دو روش ارتعاش حالت پایدار^۳ و زوال دامنه‌ی ارتعاش^۴ نشان می‌دهد که اختلاف نتایج بین دو روش مذکور برای بیشتر داده‌ها در نمودار پراکندگی داده‌ها، در بازه‌ی $\pm 15\%$ است.^[۲۵] در پژوهشی دیگر، با مقایسه‌ی میرایی حاصل از دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان^۵ مشاهده شد که دو روش اخیر، مقادیر نسبت میرایی مشابه قابل قبولی را در کرنش کوچک ارائه می‌دهند.^[۲۶]

در پژوهش حاضر، مدول برشی بیشینه و نسبت میرایی خاک ماسه‌ی رس دار با خاصیت حالت خمیری بالا برای نمونه‌های دست‌خورده‌ی خشک و دست‌خورده‌ی خشک و مرطوب در کرنش برشی کوچک ($10^{-4} - 10^{-2}\%$) با استفاده از

آزمایش ستون تشدید مطالعه شده است. همچنین نظر به این که دست‌خوردگی در خاک‌های رسی اثر کمتری دارد، اثر دست‌خوردگی و تنش محدودکننده در پارامترهای دینامیکی خاک مذکور در پژوهش حاضر بررسی شده است. مقایسه‌ی نیز بین نتایج پارامترهای دینامیکی برای نمونه‌های خشک و مرطوب انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی برای دو حالت همسان و ناهمسان، به ازای نسبت‌های ناهمسانی تنش متفاوت انجام شده است، تا اثر شرایط تنش اعمالی در المان خاک در کرنش کوچک بررسی شود. نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌گران دیگر مقایسه شده است. همچنین مقدار نسبت میرایی حاصل از روش‌های زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان در پژوهش حاضر مقایسه شده است.

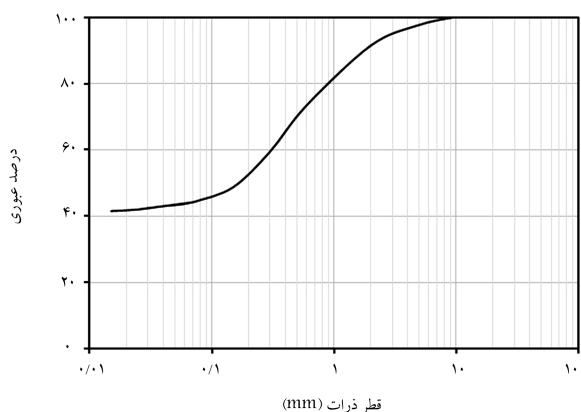
۲. مطالعات آزمایشگاهی

۱.۲. خاک مورد مطالعه

مصالح مورد استفاده در پژوهش حاضر مربوط به گمانه‌ی حفاری شده از شهر پردیس واقع در ۱۷ کیلومتری شمال‌شرقی شهر تهران است، که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. خاک مورد مطالعه بر مبنای سیستم طبقه‌بندی متحد از نوع ماسه‌ی رس‌دار (SC) با خاصیت حالت خمیری بالا بوده و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. روش ساخت نمونه‌ی آزمایش

در پژوهش حاضر از ۳ نمونه استفاده شده است، که با توجه به غیر مخرب بودن^۶ آزمایش ستون تشدید، امکان انجام آزمایش‌های متعدد، تحت شرایط مختلف تنش محدودکننده و نسبت ناهمسانی برای هر نمونه وجود دارد.^[۲۷، ۲۸] برای آماده‌سازی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.

جدول ۱. مشخصات حاصل از آزمایش‌های اولیه‌ی مکانیک خاک روی خاک مورد مطالعه.

$LL = 114$	حد روانی
$PL = 42$	حد خمیری
$PI = 72$	شاخص خمیری
$\gamma_d \max = 1/49 \text{ gr/cm}^3$	وزن مخصوص خشک بیشینه
$\omega_{opt} = 27\%$	رطوبت بهینه
$G_s = 2/54$	چگالی ویژه

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش.

نمونه	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	نسبت تخلخل
دست‌نخورده ^۱ (C.B.)	۹۵	۱۷۹/۵	۰/۵۱
دست‌خورده خشک ^۲ (R.)	۹۰	۱۷۹/۵	۰/۴۹
دست‌خورده مرطوب ^۳ (M.R.)	۹۳	۱۸۱	۰/۶۵
^۳ moist reconstituted (M.R)	^۲ reconstituted (R)	^۱ core barrel (C.B)	

جدول ۳. برنامه‌ی آزمایش‌های ستون تشدید انجام شده در پژوهش حاضر.

نوع تحکیم	$\omega(\%)$	$\sigma_r(KPa)$	e	K_c
همسان	۵	۱۵۰	۰/۵۱	۱
همسان	۵	۱۵۰	۰/۴۹	۱
همسان	۲۷	۱۵۰	۰/۶۵	۱
ناهمسان	۵	۱۵۰	۰/۵۱	۱/۴۳
ناهمسان	۵	۱۵۰	۰/۴۹	۱/۴۳
ناهمسان	۲۷	۱۵۰	۰/۶۵	۱/۴۳
همسان	۵	۳۰۰	۰/۵۱	۱
همسان	۵	۳۰۰	۰/۴۹	۱
همسان	۲۷	۳۰۰	۰/۶۵	۱
ناهمسان	۵	۳۰۰	۰/۵۱	۱/۲۱
ناهمسان	۵	۳۰۰	۰/۴۹	۱/۲۱
ناهمسان	۲۷	۳۰۰	۰/۶۵	۱/۲۱
همسان	۵	۵۰۰	۰/۵۱	۱
همسان	۵	۵۰۰	۰/۴۹	۱
همسان	۲۷	۵۰۰	۰/۶۵	۱
ناهمسان	۵	۵۰۰	۰/۵۱	۱/۱۳
ناهمسان	۵	۵۰۰	۰/۴۹	۱/۱۳
ناهمسان	۲۷	۵۰۰	۰/۶۵	۱/۱۳
همسان	۵	۷۰۰	۰/۵۱	۱
همسان	۵	۷۰۰	۰/۴۹	۱
همسان	۲۷	۷۰۰	۰/۶۵	۱
ناهمسان	۵	۷۰۰	۰/۵۱	۱/۰۹
ناهمسان	۵	۷۰۰	۰/۴۹	۱/۰۹
ناهمسان	۲۷	۷۰۰	۰/۶۵	۱/۰۹

در آزمایشگاه ژئوتکنیک بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن، و شهرسازی انجام شده است. دستگاه ستون تشدید آزمایشگاه اشاره شده، که از شرکت GDS انگلستان تهیه شده است، از نوع گیردار - آزاد استوک^۷ بوده و قادر به انجام آزمایش‌های دینامیکی تشدید در پیچش، تشدید در خمش، نسبت میرایی در پیچش و نسبت میرایی در خمش برای هر دو حالت اعمال تنش همسان و ناهمسان و نمونه‌های با قطر ۷، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر است. آزمایش‌های ستون تشدید در پژوهش حاضر مطابق با استاندارد ASTM - D4۰۱۵ انجام شده است.

۵.۲. آزمایش ستون تشدید

در آزمایش حاضر، نمونه‌های استوانه‌یی توپر یا توخالی توسط سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی تحت تحریک پیچشی، که بسامد و دامنه‌ی آن قابل کنترل است، قرار می‌گیرند. بسامد سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی تا زمانی که پاسخ نمونه

نمونه‌ی دست‌نخورده، سروته نمونه صیقل داده شد و با نسبت تخلخل ۰/۵۱، تحت شرایط خشک آزمایش شد. نمونه‌های دست‌خورده نیز به روش کوبش مرطوب و با γd_{max} و ω_{opt} مشابه شرایط صحرایی، حاصل از آزمایش‌های تراکم استاندارد آزمایشگاهی تهیه شده‌اند. برای ساخت نمونه‌ها به روش کوبش مرطوب، مخلوط خاک و آب در ۶ لایه درون قالب استوانه‌یی شکاف‌دار ریخته شدند و هر لایه به خوبی متراکم شد. برای بررسی اثر دست‌خوردگی با توجه به خشک بودن نمونه‌ی دست‌نخورده، ابتدا نمونه‌ی دست‌خورده در گرمکن خشک و سپس آزمایش شد؛ در حالی که برای بررسی اثر رطوبت، نمونه‌ی دست‌خورده‌ی تهیه شده، در همان رطوبت بهینه آزمایش شد. پس از قرار دادن هر نمونه در دستگاه ستون تشدید، ابتدا یک پوشش غشاء لاستیکی به دور آن‌ها کشیده شد و سپس تحت تنش محدودکننده قرار گرفتند. در تمام آزمایش‌ها برای ایجاد درگیری بین نمونه و پایه‌ی نگه‌دارنده‌ی ثابت و کلاهک بالای نمونه از صفحه‌ی شیاردار استفاده شد، تا نمونه در حین اعمال بارگذاری الکترومغناطیسی لغزشی نداشته باشد و سبب ایجاد خطا در مقدار کرنش نشود.

جدول ۲، مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. این تذکر لازم است که مقادیر نسبت تخلخل ارائه شده برای نمونه‌ها، با توجه به ابعاد و ویژگی‌های نمونه‌ها در هنگام آزمایش محاسبه شده و با توجه به این‌که در نمونه‌های خشک دست‌نخورده و دست‌خورده به دلیل خشک شدن، ابعاد آن‌ها کاهش یافته است؛ مقادیر نسبت تخلخل به دست آمده برای نمونه‌های خشک با مقدار نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب تفاوت دارد.

۳.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

آزمایش‌های پژوهش حاضر، شامل تشدید و نسبت میرایی در پیچش در تنش‌های محدودکننده‌ی ۱۵۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های دست‌نخورده‌ی خشک، دست‌خورده‌ی خشک، و مرطوب در دو حالت تحکیم همسان و ناهمسان، به ترتیب در نسبت‌های ناهمسانی ۱/۴۳، ۱/۲۱، ۱/۱۳ و ۱/۰۹ انجام شده است. مشخصات آزمایش‌های انجام شده در جدول ۳ ارائه شده است.

که در آن:

ω : درصد رطوبت؛

σ_r : تنش محدودکننده؛

e : نسبت تخلخل؛

K_c : نسبت ناهمسانی ($K_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_3}$)؛

σ_1 : تنش محدودکننده‌ی پیشینه؛

σ_3 : تنش محدودکننده‌ی کمینه.

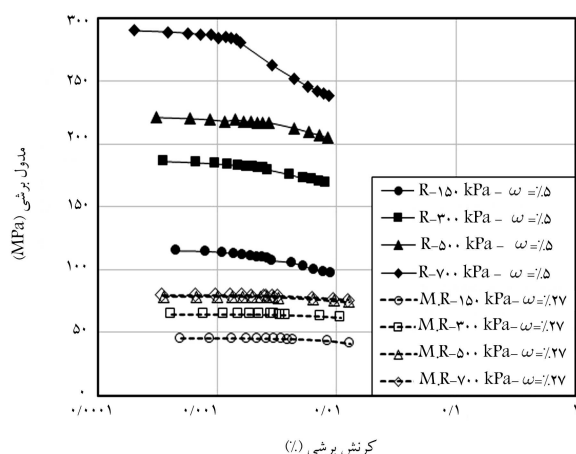
۴.۲. دستگاه ستون تشدید مورد استفاده

آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر با استفاده از امکانات آزمایشگاهی موجود

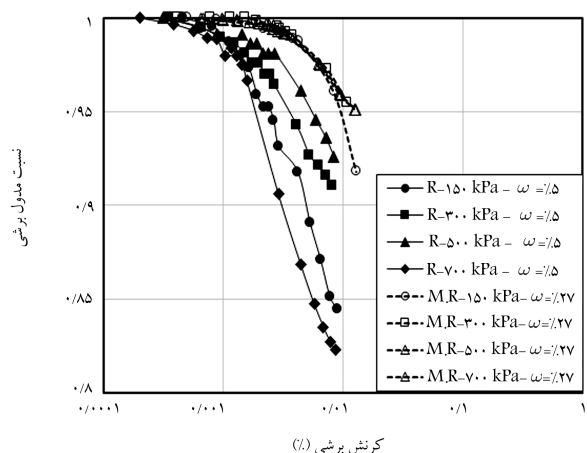
و دست نخورده می‌شود، به میزان کمیته‌ی خود می‌رسند و تقریباً نمودارهای نسبت مدول برشی دو نمونه بر هم منطبق می‌شوند. به هر حال هر چند تفاوت‌هایی بین نتایج مدول برشی نمونه‌ی دست نخورده و دست خورده‌ی خشک مطابق شکل ۳ وجود دارد، اما کرنش آستانه‌ی کشسان خمیری نسبت مدول برشی آن‌ها تقریباً مشابه است، لذا می‌توان از نتایج نسبت مدول برشی نمونه‌ی دست خورده به جای نمونه‌ی دست نخورده در تحلیل‌ها استفاده کرد.

۲.۳. اثر رطوبت

با توجه به ریزدانه‌ی موجود در نمونه و مقدار ۲۷٪ آب اضافه شده در نمونه‌ی دست خورده‌ی مرطوب، پس از اعمال هر تنش محدودکننده، آزمایش‌های تشدید و میرایی در پیچش، پس از ۲۴ ساعت تحکیم نمونه انجام شده است. شکل‌های ۶ الی ۸، اثر رطوبت را در پارامترهای دینامیکی نمونه‌ی مورد بررسی نشان می‌دهند. شکل ۶، کاهش ۶۵ درصدی مدول برشی نمونه‌ی دست خورده‌ی مرطوب را در مقایسه با نمونه‌ی دست خورده‌ی خشک در سطوح تنش محدودکننده‌ی مختلف نشان می‌دهد. کاهش مقدار مدول برشی در اثر افزودن رطوبت به نمونه در تنش‌های محدودکننده‌ی ۳۰۰ تا ۷۰۰ کیلوپاسکال به مراتب از تنش محدودکننده‌ی ۱۵۰ کیلوپاسکال بیشتر است، که این موضوع به دلیل اثر اضافه فشار آب حفره‌ی در تنش‌های محدودکننده‌ی بالاست.



شکل ۶. اثر رطوبت در مدول برشی.

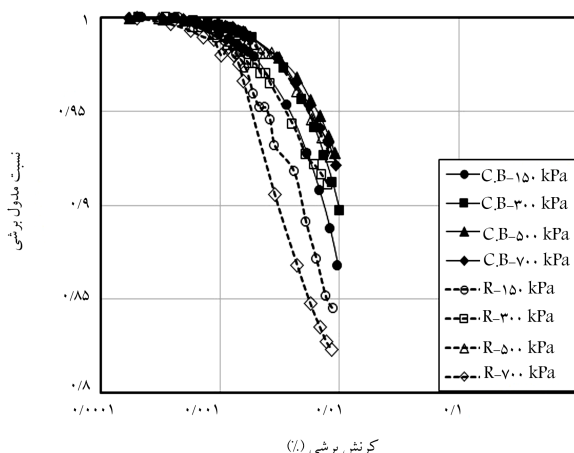


شکل ۷. اثر رطوبت در نسبت مدول برشی.

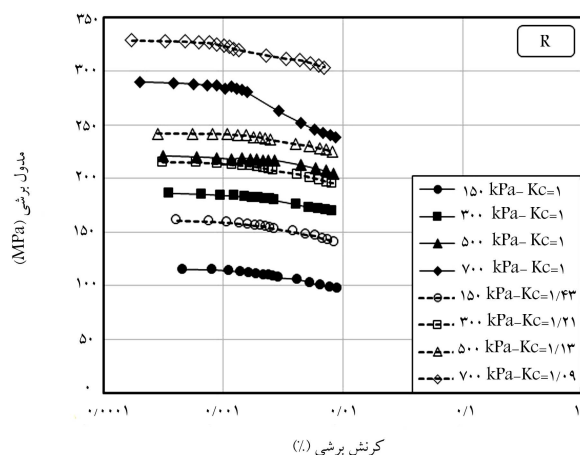
و ۴/۵ درصدی را به دنبال داشته است، که این روند در نتایج سایر پژوهش‌گران نیز مشاهده شده است.^[۲۲] علاوه بر این، افزایش تنش محدودکننده باعث می‌شود تا نمونه در سطح کرنش بزرگ‌تری، رفتار غیرخطی را آغاز کند و بدین ترتیب کرنش آستانه‌ی کشسان خمیری افزایش یابد.

با توجه به شکل ۴، تغییرات ناچیز نسبت میرایی برحسب کرنش برشی برای نمونه‌ی دست نخورده و دست خورده‌ی خشک مشاهده می‌شود. در کل دامنه‌ی تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌ی دست خورده‌ی خشک، در سطح کرنش‌های کوچک برای دامنه‌ی تنش‌های محدودکننده‌ی مورد بررسی، کوچک‌تر از نمونه‌ی دست نخورده است. همچنین با افزایش تنش محدودکننده، کاهش نسبت میرایی برای هر دو نمونه مشاهده می‌شود، که کاهش نسبت میرایی در اثر افزایش تنش محدودکننده را می‌توان به علت کاهش اتلاف انرژی در طول انتشار موج، ناشی از افزایش تماس بین ذرات و در نتیجه ایجاد مسیرهای انتقال موج بیشتر دانست.

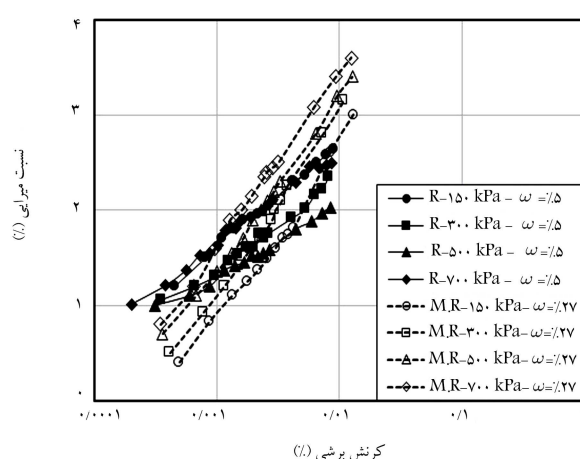
آنچه در شرایط گوناگون به لحاظ کاربردی مؤثر است، نه مدول برشی (G) و نه مدول برشی بیشینه (G_{max}) است؛ در حالی که در مصالح گوناگون، تغییرات نسبت مدول برشی (G/G_{max}) برحسب کرنش برشی (γ) نسبت به پارامترهای مختلف، اهمیت ویژه‌ی دارد. در شکل ۵، تغییرات نسبت مدول برشی بر حسب کرنش برشی، برای دو نمونه‌ی دست نخورده و دست خورده‌ی خشک در سطوح تنش محدودکننده‌ی ۱۵۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش نسبت مدول برشی در سطح کرنش‌های کوچک، نرخ کاهش جزئی دارد، که علت آن را می‌توان در ریزدانه‌ی موجود در خاک مورد مطالعه و حالت خمیری بالای آن دانست. در حالی که در سطح کرنش‌های بزرگ‌تر از ۰.۰۰۱٪، نرخ کاهش نسبت مدول برشی برای هر دو نمونه افزایش پیدا کرده است، که می‌تواند به علت شروع رفتار کشسان خمیری باشد. همچنین افزایش تنش محدودکننده، سبب افزایش نسبت مدول برشی برای هر دو نمونه می‌شود. رفتار نسبت مدول برشی نمونه‌ی دست خورده‌ی خشک در تنش محدودکننده‌ی ۷۰۰ کیلوپاسکال از روند کلی افزایش نسبت مدول برشی با افزایش تنش محدودکننده پیروی نمی‌کند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش تنش محدودکننده، تفاوت مقادیر نسبت مدول برشی برای نمونه‌ی دست نخورده و دست خورده‌ی خشک کاهش یافته است، به نحوی که در تنش محدودکننده‌ی ۵۰۰ کیلوپاسکال نمودار مدول برشی بی‌بعد شده تقریباً بر هم منطبق شده است؛ زیرا در تنش‌های بالا، آن‌قدر اثر تنش محدودکننده زیاد است که اثر عواملی که باعث ایجاد تفاوت در مقدار مدول برشی نمونه‌ی دست خورده



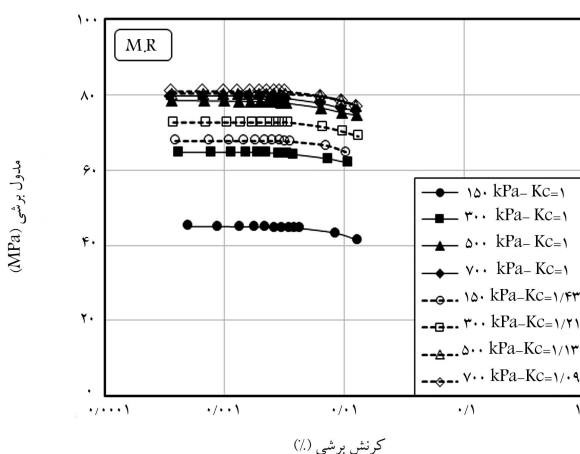
شکل ۵. اثر دست خورده‌گی و تنش محدودکننده در نسبت مدول برشی.



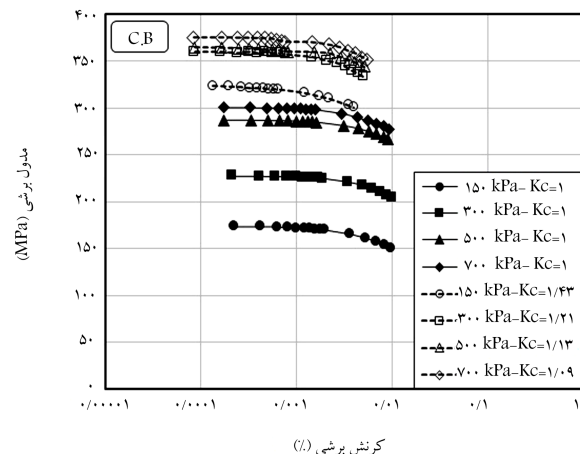
شکل ۱۰. اثر ناهمسانی تنش در مدول برشی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک.



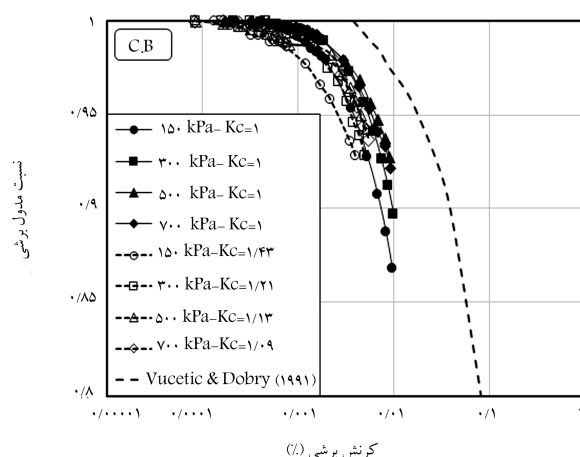
شکل ۸. اثر رطوبت در نسبت میرایی.



شکل ۱۱. اثر ناهمسانی تنش در مدول برشی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب.



شکل ۹. اثر ناهمسانی تنش در مدول برشی نمونه‌ی دست‌نخورده.



شکل ۱۲. اثر ناهمسانی تنش در نسبت مدول برشی نمونه‌ی دست‌نخورده.

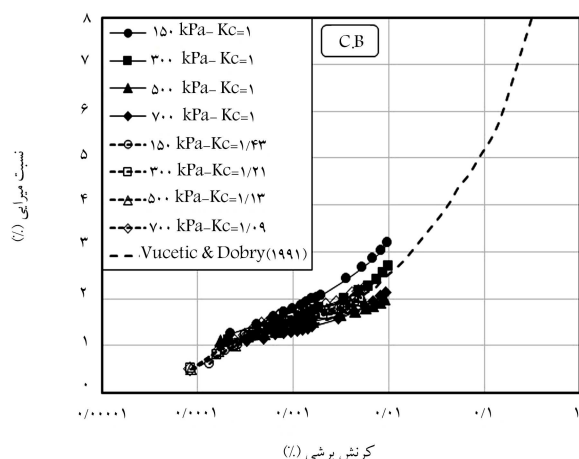
نشان می‌دهند. نسبت‌های ناهمسانی مورد استفاده در پژوهش حاضر با توجه به توزیع حباب تنش ناشی از وزن ساختمان در عمق و همچنین محدودیت‌های دستگاه انتخاب شده‌اند. در تمامی نمونه‌ها، ناهمسانی تنش سبب افزایش مدول برشی شده است، اما بازه‌ی تغییرات مدول برشی در نمونه‌های غیرهمسان از نمونه‌های همسان کمتر است. لازم به ذکر است که آثار افزایشی مدول برشی در نمودارها ناشی از

با توجه به شکل ۷، نسبت مدول برشی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک از نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب کمتر است. همچنین با مقایسه‌ی کرنش آستانه‌ی شروع رفتار کشسان خمیری برای نمونه‌های دست‌خورده‌ی مرطوب و خشک در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که کرنش آستانه برای نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب از نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک بیشتر است، که این یافته برای انتخاب منحنی‌های نسبت مدول برشی برحسب کرنش برشی در شرایط واقعی اهمیت زیادی خواهد داشت. علاوه بر این، تغییرات نسبت مدول برشی با افزایش تنش محدودکننده در نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک از نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب بیشتر است.

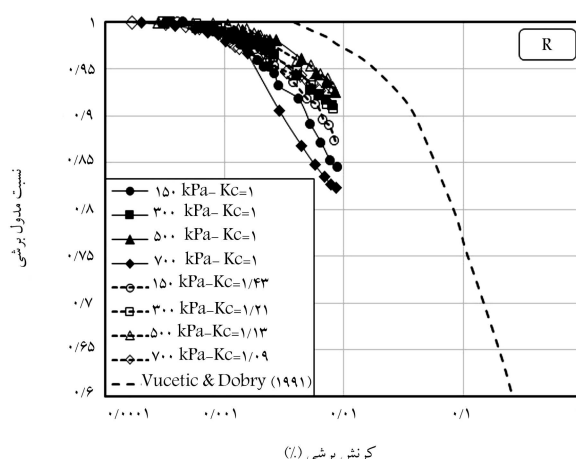
همان‌گونه که در شکل ۴ ملاحظه شد، مقادیر نسبت میرایی نمونه‌های خشک با افزایش تنش محدودکننده کاهش می‌یابد، در صورتی که مطابق با شکل ۸، در نمونه‌ی مرطوب با افزایش تنش محدودکننده، افزایش نسبت میرایی مشاهده می‌شود. همچنین در کرنش‌های کوچک‌تر از 0.003% مقدار نسبت میرایی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک از نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب بیشتر است، در حالی که در کرنش‌های بزرگ‌تر مقدار نسبت میرایی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب از نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک بیشتر است.

۳.۳. اثر ناهمسانی تنش

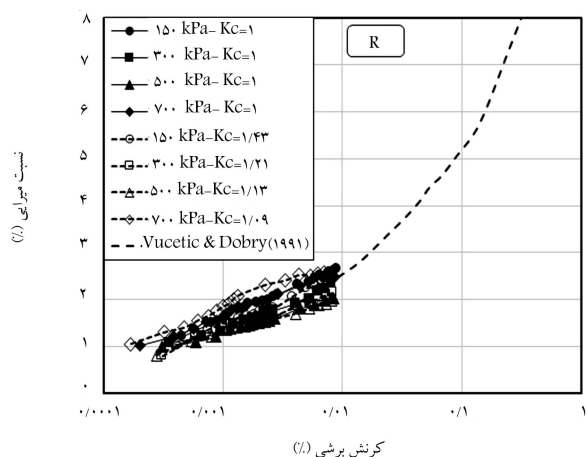
شکل‌های ۹ الی ۱۷، اثر ناهمسانی را در پارامترهای دینامیکی نمونه‌های مورد بررسی



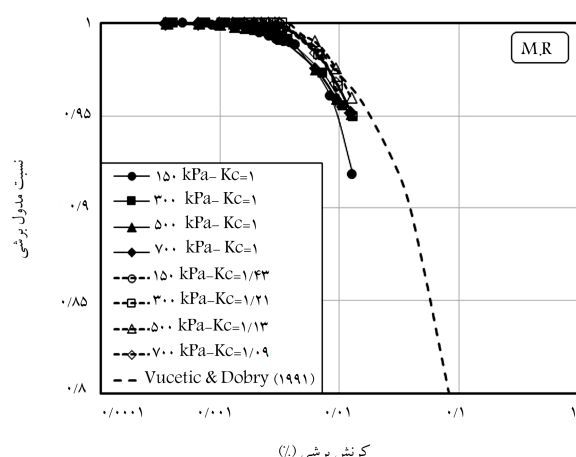
شکل ۱۵. اثر ناهمسانی تنش در نسبت میرایی نمونه‌ی دست‌خورده.



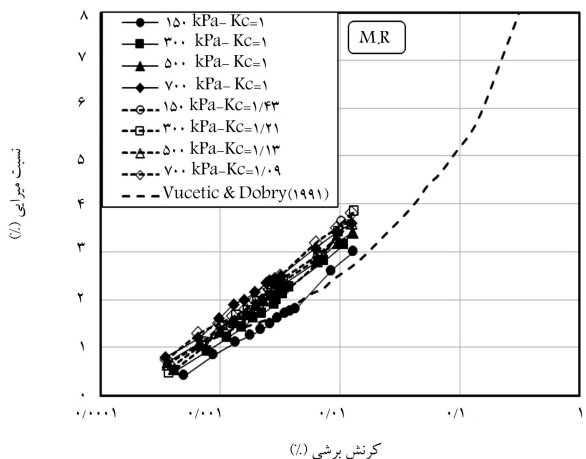
شکل ۱۳. اثر ناهمسانی تنش در نسبت مدول برشی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک.



شکل ۱۶. اثر ناهمسانی تنش در نسبت میرایی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک.



شکل ۱۴. اثر ناهمسانی تنش در نسبت مدول برشی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب.



شکل ۱۷. اثر ناهمسانی تنش در نسبت میرایی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب.

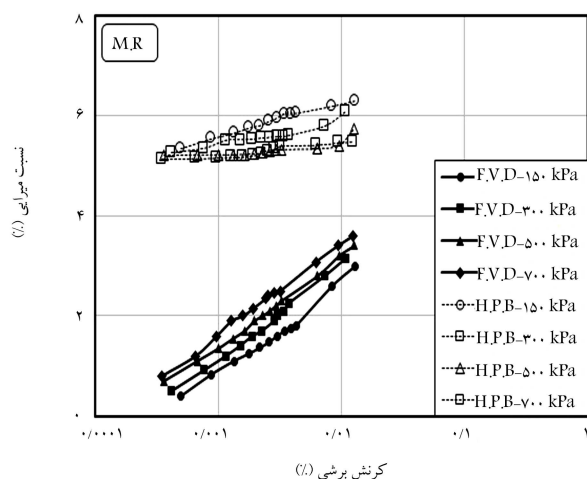
افزایش مقدار نسبت ناهمسانی و افزایش تنش میانگین است. به‌عنوان مثال، در نمونه‌ی دست‌خورده، به ازاء تنش محدودکننده‌ی ۱۵۰ کیلوپاسکال، مقدار مدول برشی در حالت ناهمسان نسبت به حالت همسان ۴۶٪ افزایش پیدا کرده است؛ در حالی‌که در تنش محدودکننده‌ی ۵۰۰ کیلوپاسکال؛ مقدار مدول برشی حالت ناهمسان نسبت به حالت همسان فقط ۲۱٪ افزایش یافته است.

در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، اثر ناهمسانی تنش در نسبت مدول برشی بررسی شده است. در نمونه‌ی دست‌خورده و نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک، نسبت مدول برشی در حالت اعمال تنش همسان از حالت ناهمسان بیشتر است، در حالی‌که در نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب، عکس روند ذکر شده مشاهده می‌شود. تقریباً می‌توان نمودارهای نسبت مدول برشی در تنش‌های محدودکننده‌ی همسان و ناهمسان را برای نمونه‌های مورد بررسی بر هم منطبق دانست.

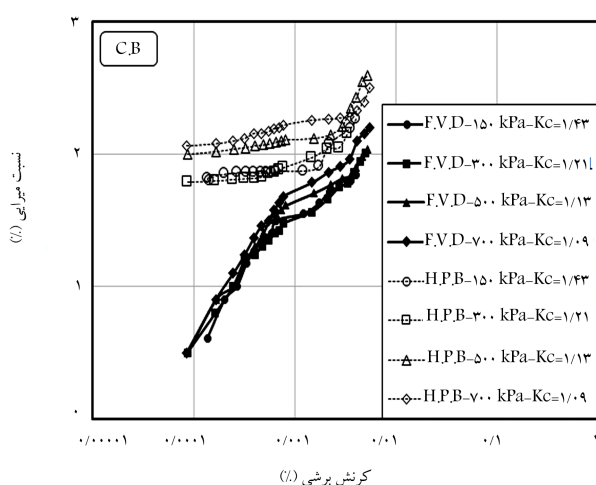
مطابق با شکل‌های ۱۵ الی ۱۷، در رابطه با اثر نسبت ناهمسانی در نسبت میرایی نمونه‌های مورد آزمایش می‌توان گفت، هر چند در نمونه‌های دست‌خورده‌ی خشک و مرطوب نسبت ناهمسانی باعث افزایش جزئی نسبت میرایی در مقایسه با حالت همسان شده است، اما به‌طور کلی مقدار نسبت میرایی نمونه‌ها برای دو حالت اعمال تنش محدودکننده به‌صورت همسان و ناهمسان با هم برابر است.

برای اهداف مقایسه‌ی، منحنی‌های نسبت مدول برشی و نسبت میرایی به دست آمده برای نمونه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر با نتایج ووستیک و

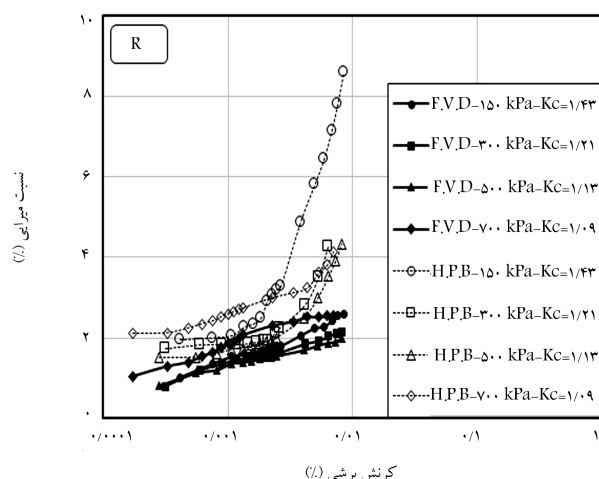
دوبری^{[۳۱]، [۳۰]} مقایسه شده است. برای این منظور مصالح مورد مطالعه با شاخص خمیری ۷۲٪ با منحنی با شاخص خمیری ۴۰٪ تا ۸۰٪، که سال‌ها مورد استفاده‌ی پژوهش‌گران و مهندسان بوده است، در شکل‌های ۱۲ الی ۱۷ مقایسه شده است. مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، منحنی پیشنهادی ووستیک و دوبری، مقدار نسبت مدول برشی را برای نمونه‌ی دست‌خورده و دست‌خورده‌ی خشک تا حدودی دست



شکل ۲۰. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان برای نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب.



شکل ۲۱. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان برای نمونه‌ی دست‌خورده‌ی در حالت ناهمسان.



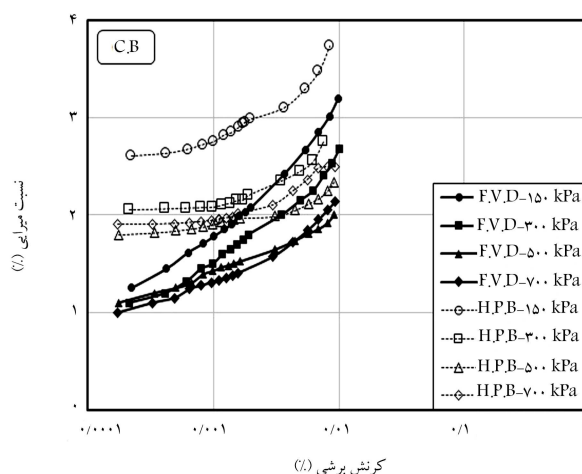
شکل ۲۲. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان برای نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک در حالت ناهمسان.

بالا پیشنهاد می‌کند، در حالی که منحنی مذکور تقریباً بر نمودارهای نسبت مدول برشی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب منطبق است (شکل ۱۴).

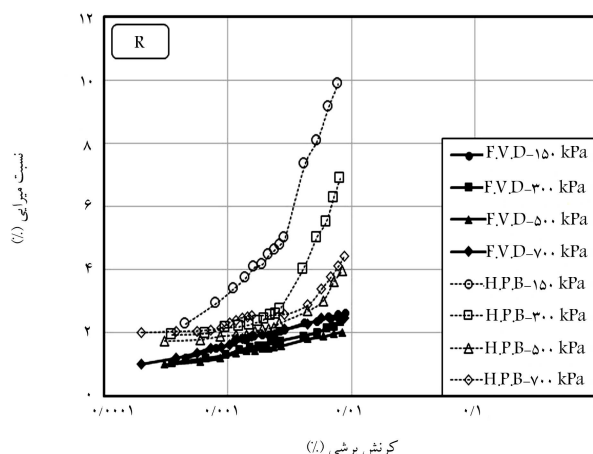
مقایسه‌ی نتایج نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های مورد مطالعه با منحنی ارائه شده توسط ووستیک و دوبری که در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ ارائه شده است، بیان‌گر آن است که مقدار نسبت میرایی نمونه‌های دست‌خورده، دست‌خورده‌ی خشک و دست‌خورده‌ی مرطوب با منحنی ووستیک و دوبری تقریباً مطابقت دارد.

۴.۳. مقایسه‌ی روش‌های تعیین نسبت میرایی

مقایسه‌ی بین مقادیر نسبت میرایی حاصل از دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان برای نمونه‌های مورد بررسی در حالت اعمال تنش محدودکننده به صورت همسان و ناهمسان در شکل‌های ۱۸ الی ۲۳ ارائه شده است. در تمام نمونه‌ها مقادیر نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان از روش زوال دامنه‌ی ارتعاش بیشتر است. همچنین نسبت میرایی در کرنش‌های کوچک در روش نصف عرض توان، مقداری ثابت دارد؛ در حالی که در روش زوال دامنه‌ی ارتعاش روندی افزایشی از خود نشان داده است. با دقت در نمونه‌های دست‌خورده‌ی خشک و مرطوب



شکل ۱۸. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان برای نمونه‌ی دست‌خورده.



شکل ۱۹. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان برای نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک.

روش‌های مختلف اندازه‌گیری میرایی، شامل کاهش دامنه و روش نصف عرض توان بررسی شده است.

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزایش کرنش برشی، به دلیل رفتار غیرخطی خاک مدول برشی و نسبت میرایی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. مقادیر مدول برشی نمونه‌ی دست‌نخورده از نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک بیشتر بوده و افزایش تنش محدودکننده، افزایش مدول برشی را به دنبال داشته است. تغییرات ناچیز نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده‌ی خشک از دیگر نتایج پژوهش حاضر است. افزایش تنش محدودکننده، افزایش نسبت مدول برشی را برای هر دو نمونه‌ی دست‌نخورده و دست‌خورده‌ی خشک به دنبال داشته و نمودارهای نسبت مدول برشی نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده‌ی مرطوب تقریباً بر هم منطبق بوده است.

نتایج به دست آمده، کاهش ۶۵ درصدی مدول برشی نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب را در مقایسه با نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک نشان می‌دهند. همچنین تغییرات نسبت مدول برشی با افزایش تنش محدودکننده در نمونه‌ی دست‌خورده‌ی خشک از نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب بیشتر بوده و افزایش تنش محدودکننده، سبب افزایش نسبت میرایی در نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب شده است. ناهمسانی تنش، افزایش مدول برشی را در نتایج آزمایشگاهی به دنبال داشته و مقدار ناهمسانی نقش مؤثری را در روند افزایش مدول برشی ایفا کرده است. مطابق با نتایج، نمودارهای نسبت مدول برشی در تنش‌های محدودکننده‌ی همسان و ناهمسان تقریباً بر هم منطبق و مقدار نسبت میرایی نمونه‌ها برای دو حالت اعمال تنش محدودکننده به صورت همسان و ناهمسان تقریباً با هم برابر بوده است.

منحنی پیشنهادی ووستیک و دوبری، مقدار نسبت مدول برشی را برای نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده‌ی خشک تا حدودی دست بالا پیشنهاد می‌کند، اما منحنی اخیر تقریباً بر نمودارهای نسبت مدول برشی نمونه‌های دست‌خورده منطبق است. همچنین مقدار نسبت میرایی نمونه‌های دست‌نخورده، دست‌خورده‌ی خشک و مرطوب با منحنی ووستیک و دوبری تقریباً مطابقت دارد.

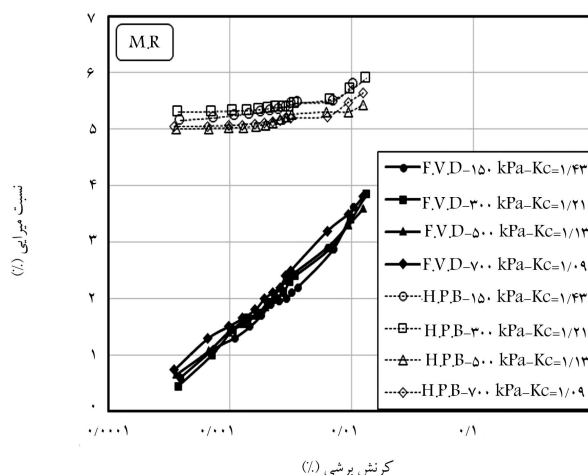
مقایسه‌ی مقادیر نسبت میرایی حاصل از دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان در نمونه‌های مورد بررسی در حالت اعمال تنش محدودکننده به صورت همسان و ناهمسان نشان می‌دهد که مقادیر نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان از روش زوال دامنه‌ی ارتعاش بیشتر است.

تقدیر و تشکر

نوشتار حاضر، با کمک مالی مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، با عنوان پروژه‌ی «بررسی رفتار دینامیکی خاک ماسه‌ی بازسازی شده با دستگاه ستون تشدید» با شماره‌ی ۸۹-۱۱۰-۳۹-۹۶ موج ۱۰/۵/۱۳۹۶ انجام شده است، که بدین وسیله از کلیه‌ی همکاران بخش ژئوتکنیک مرکز نامبرده تشکر می‌شود.

پانویس‌ها

1. lanzhou loess
2. macao marine clay



شکل ۲۳. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان برای نمونه‌ی دست‌خورده‌ی مرطوب در حالت ناهمسان.

مشاهده می‌شود که مقدار نسبت میرایی محاسبه شده به روش نصف عرض توان در مقایسه با روش زوال دامنه‌ی ارتعاش ۲ الی ۳ برابر افزایش یافته است، در حالی که این روند برای نمونه‌ی دست‌نخورده مشاهده نمی‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

مدول برشی و نسبت میرایی از مهم‌ترین پارامترهای دینامیکی خاک‌ها برای انجام طراحی لرزه‌ی سازه‌ها هستند. یکی از دلایل تفاوت بین مقادیر پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی با مقادیر صحرایی به دلیل دست‌خوردگی و عدم بازسازی شرایط تنش صحرایی نمونه‌هاست. بی‌توجهی به آثار دست‌خوردگی در خواص دینامیکی خاک‌ها در آزمایش‌ها و تحلیل‌های لرزه‌ی جنبش زمین می‌تواند موجب بی‌دقتی در تحلیل‌های پاسخ لرزه‌ی شود. به همین سبب، شناخت رفتار دینامیکی مصالح از طریق انجام آزمایش‌های دینامیکی روی مصالح دست‌نخورده و مقایسه‌ی آن با رفتار نمونه‌های دست‌خورده تحت شرایط تنش تحکیمی مختلف ضروری است. به این منظور در پژوهش حاضر، خواص دینامیکی نمونه‌های ماسه‌ی دست‌نخورده و دست‌خورده در بازه‌ی کرنش‌های کوچک با انجام آزمایش‌های ستون تشدید در پیچش مطالعه شده و اثر تنش محدودکننده و رطوبت در پارامترهای دینامیکی خاک مذکور بررسی شده است. آزمایش‌ها در دو حالت اعمال تنش همسان و ناهمسان با نسبت‌های ناهمسانی مختلف انجام شده است تا اثر شرایط تنش اعمالی در آلمان خاک بررسی شود. همچنین مقدار نسبت میرایی حاصل از

3. steady-state vibration
4. free-vibration decay
5. half-power bandwidth
6. nondestructive test
7. stokoe

8. free vibration decay method (FVD)
9. half power bandwidth method (HPB)
10. Vucetic and Dobry

(References) منابع

1. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall Inc, 670 p. USA (1996).
2. Aghaei Araei, A. "Maximum shear modulus and damping ratio of dacite sand and gravel", *Journal of Engineering Geology*, **1**, pp. 3227-3244 (In Persian) (2015).
3. Jafarian, Y., Hadad, A. and Javdanian, H. "Predictive model for normalized shear modulus of cohesive soils", *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, **11**(1), pp. 89-100 (2015).
4. Shafiee, A., Dabiri, R. and Askari, F. "Dynamic properties of firoozkooch sand-silt mixture", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **19**(4), pp. 273-284 (2017).
5. Dammala, P.K., Krishna, A.M., Bhattacharya, S. and et al. "Dynamic soil properties for seismic ground response studies in Northeastern India", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **100**, pp. 357-370 (2017).
6. Patino, H., Martinez, E., Gonzalez, J. and et al. "Shear modulus of a saturated granular soil derived from resonant column test", *Acta Geotechnica Slovenica*, **2**, pp. 33-45 (2017).
7. Jafarzadeh, F. and Sadeghi, H. "Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation", *Soil Dynamic sand Earthquake Engineering*, **32**(1), pp. 26-41 (2012).
8. Jafarian, Y., Hadad, A. and Javdanian, H. "Estimating the shear modulus of Bushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments", *Modares Civil Engineering Journal*, **15**(4), pp. 9-19 (In Persian) (2016).
9. Jafarian, Y., Javdanian, H. and Hadad, A. "Comparing of dynamic behavior of Hormoz calcareous and Babolsar siliceous sands under identical conditions", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **3**(3), pp. 1-10 (In Persian) (2016).
10. Ha, I.S. "Comparison of shear wave velocities evaluated in the core zone of an existing fill dam by field and laboratory tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **100**, pp. 276-285 (2017).
11. Chuancheng, Y., Wenxia, C. and Haiyue, D. "Research on comparison of the maximum dynamic shear modulus test", *Procedia Engineering*, **28**, pp. 230-234 (2012).
12. Fang, H.Y., *Foundation Engineering Handbook*, Kluwer Academic Publishers, USA, 2nd Edn., pp. 37-43 (2002).
13. Park, D.S. and Kishida, T. "Shear modulus reduction and damping ratio curves for earth core materials of dams", *Canadian Geotechnical Journal*, **56**(1), pp. 14-22 (2018).
14. Song, B., Tsinaris, A., Anasasiadis, A. and et al. "Small-strain stiffness and damping of lanzhou loess", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **95**, pp. 96-105 (2017).
15. Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki, T. and et al. "Cyclic undrained shear properties of high undisturbed tokyo gravel", *Soil and Foundations*, **28**(4), pp. 57-68 (1988).
16. Goto, S., Suzuki, Y., Nishio, S. and et al. "Mechanical properties of undisturbed tone-riverGravel obtained by in-situ freezing method", *Soil and Foundations*, **32**(3), pp. 15-25 (1992).
17. Ghodrati Ghazaani, A. "The evaluation of the effect of frequency and anisotropy on dynamic behavior of mixed soils using large scale triaxial apparatus", Ph.D. Thesis, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran (In Persian) (2017).
18. Youn, J.U., Choo, Y.W. and Kim, D.S. "Measurement of small-strain shear modulus Gmax of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(10), pp. 1426-1438 (2008).
19. Hao, G. and Lok, T.M.H. "Study of shear wave velocity of maccao marine clay under anisotropic stress condition", *14th World. Conf. on Earthquake Engineering*, Beijing, China, pp. 1-8 (2008).
20. Jafarian, Y., Javdanian, H. and Hadad, A. "Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions", *Soils and Foundation*, **58**(1), pp. 172-184 (2018).
21. Jafarian, Y., Javdanian, H. and Hadad, A. "Strain-dependent dynamic properties of Bushehr siliceous-carbonate sand: experimental and comparative study", *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, **107**, pp. 339-349 (2018).
22. Jafarian, Y., Javdanian, H. and Hadad, A. "Laboratory study on the maximum shear modulus of Bushehr calcareous sand", *Sharif Civil Engineering Journal*, **33**(1), pp. 45-52 (In Persian) (2017).
23. Payan, M. "Study of small strain dynamic properties of sands and silty sands", Ph.D. Thesis, University of New South Wales Sydney, Australia (2017).
24. Senetakis, K. and Payan, M. "Small strain damping ratio of sands and silty sands subjected to flexural and orsional resonant column excitation", *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, **114**, pp. 448-459 (2018).
25. Senetakis, K., Anastasiadis, A. and Pitilakis, K. "A comparison of material damping measurement in resonant column using the steady-state and free-vibration decay methods", *Soils Dynamics and earthquake Engineering*, **74**, pp. 10-13 (2015).
26. Payan, M., Senetakis, K., Khoshghalb, A. and et al. "Influence of particle shape on small-strain damping ratio of dry sands", *Geotechnique*, **66**(7), pp. 610-616 (2016).

27. ASTM, "Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant column method: D4015-92", Annual book of ASTM standards, USA: ASTM International (2000).
28. Ishihara, K. "Soil behavior in earthquake geotechnics", Oxford University Press Inc., pp. 46-54 New York (1996).
29. Das, B.M. and Ramana, G.V., *Principles of Soil Dynamics*, 2nd Edn, Cengage Learning Publication, pp. 37-40, USA (2011).
30. Vucetic, M. and Dobry, R. "Effect of soil plasticity on cyclic response", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(1), pp. 89-107 (1991).
31. Aghaei Araei, A., Attarchian, N., Ahmadi, S. and et al. "Assessment of dynamic behavior of reconstituted sand using resonant column test", Report No: 96-39-11089, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran (In Persian) (2018).